

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ИНВЕРТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И АНАЛИЗ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Т. В. Алферова¹, А.А. Алферов¹, С.И. Бахур¹, В. Н. Галушко²

УО «ГГТУ им. П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь¹
УО «Белорусский государственный университет транспорта», г.
Гомель, Республика Беларусь²

Аннотация. В статье рассматриваются способы регулирования частоты и напряжения на примере трехфазного автономного инвертора напряжения (АИН) с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) на несущей частоте. По полученным результатам произведен расчет расхождения значений момента и напряжения, полученных расчетным и модельным путём. Рассмотрен вариант ШИМ управления трехфазного асинхронного двигателя, характеризующийся минимальностью гармонических составляющих, электрических и магнитных потерь, разброса момента относительно среднего значения. Предложена адекватная модель трехфазного инвертора асинхронного двигателя.

Ключевые слова: трехфазный инвертор напряжения, широтно-импульсная модуляция, математическая модель, рабочие характеристики электродвигателя.

Введение. Постоянное увеличение числа асинхронных электродвигателей, питаемых от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), с регулируемой скоростью требует хорошего понимания всей системы электропитания, а также взаимодействия между ее отдельными частями.

Асинхронный двигатель (АД), работающий от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), подвергается влиянию гармоник напряжения с частотой выше основной частоты питания. В зависимости от типа используемой ШИМ, частоты переключения и других особенностей управления, эффективность электродвигателя может снижаться, а потери, температура, шум и уровень вибрации повышаются.

Кроме выше перечисленных, могут проявляться и другие эффекты при питании асинхронного электродвигателя от преобразователя частоты. Диэлектрический стресс системы изоляции и

напряжения вала вместе с потенциально опасными подшипниковыми токами являются хорошо известными побочными эффектами. Существующие решения для уменьшения гармоник [1,3]:

- установка выходных пассивных фильтров (L, LC, dV/dt);
- использование многоуровневого преобразователя;
- улучшение качества ШИМ;
- увеличение несущей частоты.

В настоящее время в эксплуатацию на Белорусской железной дороге введены электровозы и электропоезда с асинхронным тяговым приводом (АТП), которые позволяют осуществлять регулирование амплитуды напряжения и частоты на АТП при их работе в режимах тяги и рекуперации.

На электровозах переменного тока БКГ-1 широкое применение нашли схемы, собранные по схеме источник питания – выпрямитель – инвертор – двигатель. Номинальное напряжение в контактной сети переменного тока с промышленной частотой 50 Гц составляет 25 кВ, а рабочее напряжение силового оборудования электровоза значительно меньше, поэтому необходимо понижать это напряжение до номинальных значений, а также осуществлять регулирование частоты и амплитуды выходного напряжения на АТП для изменения их частоты вращения и изменения силы тяги электровоза.

Основная часть. Для анализа эффективности применения АТП на электрическом подвижном составе была разработана математическая модель в программе Matlab (Simulink), включающая в себя следующие элементы: источник постоянного напряжения (DC Voltage Source) с амплитудой 540 В, питающий инвертор напряжения (Universal Bridge), построенный на блоках IGBT транзисторов. Источник постоянного напряжения моделирует звено постоянного тока. Работой инвертора напряжения управляет блок Subsystem, который вычисляет модулирующие сигналы управления транзисторами в плечах инвертора по заранее заданным математическим выражениям, и блок Control System, который генерирует пилообразное напряжение несущей частоты. Работа этих блоков представляет широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) выходного напряжения. В модели также используется трехфазный асинхронный двигатель Asynchronous Machine, позволяющий изменять нагрузку на валу двигателя при помощи блока Step. Основные параметры инвертора и асинхронного двигателя контролируются при помощи блоков Multimeter [4, 7, 8].

При анализе работы АТП учитывались все значимо влияющие гармоники подаваемого напряжения, которые негативно сказываются на работе АТП и могут привести к ускоренному старению изоляции обмоток, возникновению тормозного момента на валу двигателя и др.

В работе рассматриваются способы регулирования частоты и напряжения на примере трехфазного автономного инвертора напряжения (АИН) с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) на несущей частоте. По сравнению с однофазным инвертором, в трехфазном АИН моделирующие напряжения управления транзисторами каждого плеча инвертора сдвинуты на 120 градусов. Эти сигналы сравниваются с пилообразным несущим напряжением и формируют сигналы управления каждым плечом. В соответствии с сигналами управления транзисторами формируется напряжения на каждой фазе нагрузки.

В настоящее время автономные инверторы все чаще используются в электромеханических системах электропитания в качестве активных выпрямителей, активных фильтров, компенсаторов реактивной мощности и т.д. Во всех этих устройствах инвертор с одной стороны присоединен к источнику постоянного напряжения, а с другой – к двигателю. В данной модели блок DC Voltage Source имитирует звено постоянного тока. Блок Universal Bridge представляет собой трехфазный автономный инвертор напряжения, работающий на IGBT транзисторах [7]. Инверторы подобного типа отличаются простотой сборки и применением на них более совершенных и простых способов управления, построенных на базе ШИМ. Блок Asynchronous Machine – это трехфазный асинхронный двигатель. Блок Machine Measurement измеряет электромеханические характеристики двигателя и выводит полученные результаты на осциллографы Scope 3 и Scope 1).

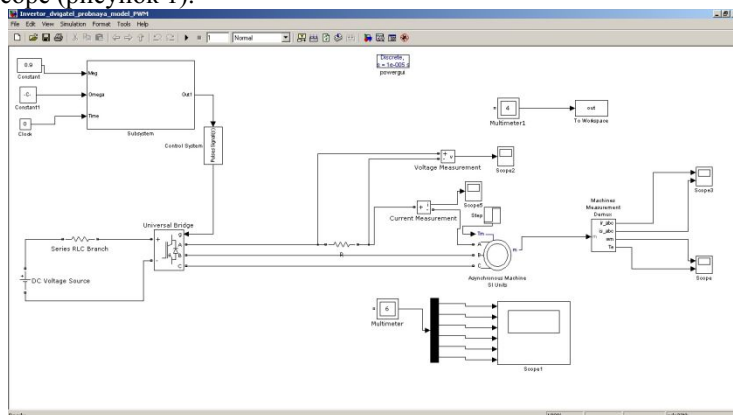


Рисунок 1 – Математическая модель инвертор-двигатель

Для управления инвертором в данной модели используется принцип широтно-импульсной модуляции, который реализуется в блоках Subsystem и Control System. В блоке Subsystem происходит

вычисление модулирующих сигналов управления транзисторами в плечах А, В и С инвертора. На вход блока Subsystem подано три сигнала: $u(1)$ – амплитуда модулирующего напряжения (блок Mag), $u(2)$ – угловая частота модулирующего напряжения (блок Omega) и $u(3)$ – текущее время (блок Clock). Путем сравнения всех этих величин в блоке Subsystem формируется сигнал, который подается к блоку Control System. В этом блоке генерируются импульсы широтно-импульсной модуляции по несущей частоте 500 Гц. В конечном итоге совместная работа этих двух блоков формирует импульсы для управления IGBT транзисторами. В блоке инвертора Universal Bridge, путем применения ШИМ, постоянное напряжение на входе преобразуется в практически синусоидальное на выходе, и подается на трехфазный двигатель.

Для измерения токов и напряжений на IGBT транзисторах, в данной модели установлен блок Multimeter, который выводит полученные значения на осциллограф Scope1.

Блок Voltage Measurement и Current Measurement, установленные в фазе А инвертора, измеряют, соответственно, напряжение и ток фазы А, а полученные значения выводятся на осциллографы Scope2 и Scope5.

Блоки R1 и R2 имитируют сопротивление проводов для измерения напряжений и токов.

Результаты моделирования, представленные на рисунке 2, указывают на верификацию широтно-импульсной модуляции с помощью формы кривой напряжения и тока.

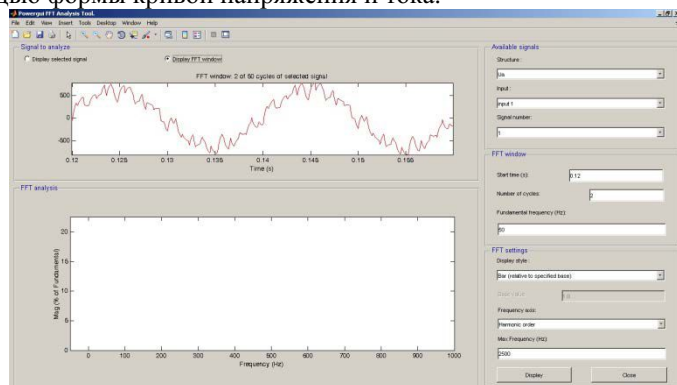


Рисунок 2 – Форма кривой напряжения на выходе инвертора фазы А

Из рисунка видно, что форма кривой напряжения практически синусоидальна, а, следовательно, можно сделать вывод, что ШИМ выполняется.

В ходе проведения исследований было установлено, что

добиться минимального значения гармонических составляющих без установки дополнительных LC-фильтров можно посредством регулирования ШИМ. При этом необходимо подобрать такое количество импульсов в ходе применения ШИМ, при котором значение несущей гармоники (в данном случае первой) будет минимально, а значения других будут отсутствовать как таковые [5, 6]. Такие расчеты были произведены для электровоза БКГ-1. Результаты расчетов представлены на рисунке 3.

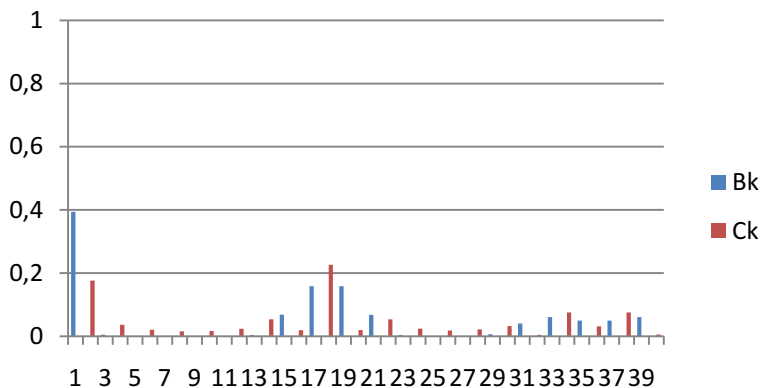


Рисунок 3 – Результаты расчета коэффициентов гармоник ВК и СК при 8 импульсах

Из анализа результатов полученных исследований можно сделать предварительный вывод о том, что амплитуда первой гармоники напрямую зависит от количества подаваемых импульсов, что в свою же очередь зависит от частоты модулирующего напряжения. Из рисунков можно увидеть, что приемлемое количество импульсов при работе ШИМ находится в пределах от 8 до 11. Косинусные составляющие СК можно не учитывать, т.к. ШИМ является синусоидальной и косинусных составляющих здесь быть не может.

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

1) При многократной широтно-импульсной модуляции, когда на входе преобразователя имеется 8 импульсов, $\cos\varphi$ гармоник имеет сравнительно небольшое значение 0,279 по сравнению с другими случаями применения ШИМ.

2) Мы добились снижения гармоник, оказывающих негативное воздействие на оборудование электровоза БКГ-1. В частности, уменьшилось значение 5-ой гармоники, оказывающей тормозящее

воздействие на двигатель. Уменьшились гармоники 3-го порядка, негативно влияющие на элементы защиты электровоза от токов короткого замыкания, построенные на омическом сопротивлении.

Следует отметить, что при расчёте коэффициентов мощности не учитывались гармоники высшего порядка, поскольку большинство из них фильтруются на конденсаторных батареях и резонансном LC-фильтре, установленных в промежуточной цепи постоянного тока.

При анализе работы трехфазного асинхронного двигателя измерялись значения токов ротора и статора, частота вращения и электромагнитный момент на валу короткозамкнутого ротора двигателя. Для проведения измерений в блоке Step установлено конечное значение нагрузки на валу в 200 Н (при моделировании, с учетом шага дискретизации, программа плавно увеличивает нагрузку на валу до этого значения).

По полученным результатам произведен расчет расхождения значений момента и напряжения, полученных расчетным и модельным путём. Предел в расхождении значений условно примем 6%.

Исходя из расчетов можно сделать некоторые выводы:

- расхождение значений моментов в 5,33% обусловлено тем, что при вводе параметров двигателя в модели не учитываются формы пазов, их расположение и размер, а также количество витков статорной и роторной обмоток с учетом всех их параметров. Таким образом, несмотря на все эти недостатки, расхождение в значениях, полученных расчетным и модельным путем не превышает 6%, что вполне адекватно для данной модели.

- расхождение напряжения в 0,52% обусловлено тем, что источник не является идеальным. В расчетах используется идеальный источник питания без учета индуктивности и активного сопротивления обмоток, а в модельном эксперименте необходимо указывать значения индуктивности и сопротивления источника питания, в противном случае модель не будет работать. Этим и объясняется столь малое расхождение в значениях.

Для анализа различных показателей работы электрооборудования с ним были проведены приборные исследования. Ниже представлены некоторые результаты.

Оборудование и приборы: Ваттметры, мультиметры, трехфазный инвертор на базе микроконтроллера MB90F562 (Fujitsu) и силового интеллектуального модуля PS11033 (Mitsubishi), синхронный генератор, ЛАТР, источники постоянного регулируемого напряжения, испытательная установка – “черный ящик”.

В процессе исследований изучалось влияние частоты, напряжения и температуры на электропотребление и рабочие характеристики АД.

В качестве выходных значений регистрировались следующие: напряжение, ток, частота сети, активная и полная мощность, КПД трехфазного инвертора; напряжение, частота, момент на валу, линейные токи, $\cos\phi$, частота вращения, подводимая активная и полезная мощности на валу, КПД АД.

В качестве объекта исследования были использованы АД номинальной мощностью 60, 1100, 1700 Вт.

I Сравнение характеристик АД *при изменении напряжения и частоты с помощью трехфазного инвертора и синхронного генератора (СГ).*

С помощью однофакторного дисперсионного анализа в программном продукте Microsoft Excel, StatGraphics и Statistica изучалось влияние трехфазного инвертора на электропотребление и рабочие характеристики АД. С интервалом 10 В изменяли напряжение на выходе трехфазного инвертора, а затем синхронного генератора, регистрируя выходные данные при фиксированных нагрузках на валу.

Для инвертора и синхронного генератора различие между средними линейными токами обмотки статора и частотой вращения ротора статистически значимо (на уровне соответственно $p = 0,00667$ и $0,216$, то есть меньше, чем критическое значение $0,05$), что обусловлено влиянием формы кривой напряжения. То есть от СГ при тех же нагрузках протекал меньший ток в статорной обмотке по сравнению с инвертором.

КПД АД значимо выше для пониженных напряжений, создаваемых СГ по сравнению с трехфазным инвертором.

На основании изменения входных и регистрации выходных параметров выдвигаем различные гипотезы о виде регрессионной зависимости между переменными с целью подбора уравнения регрессии. Приведем некоторые результаты одиночной и множественной регрессии, установленных в ходе проведенных исследований:

- КПД АД и КПД трехфазного инвертора существенно не изменяется с ростом напряжения при фиксированных нагрузках на валу;

- изменение частоты в диапазоне от 45 до 52 Гц при фиксированных нагрузках на валу значительно влияет на КПД АД ($\eta = -0,002 f^3 + 0,330 f^2 - 16,11 f + 262,4$; $R^2 = 1$) создавая локальный минимум на частоте 47 Гц, и максимум при 51 Гц;

- также наблюдается влияние частоты на выходе инвертора на его КПД: $\eta = -0,005 f^3 + 0,778 f^2 - 38,77 f + 643,6$; $R^2 = 1$;

- исключение слагаемых (пошаговый регрессионный анализ в программе Statgraphics) незначимо ухудшило предсказательные

возможности уравнения регрессии (коэффициент детерминации уменьшился). При этом значение приведенного коэффициента детерминации увеличилось.

Дальнейшие попытки добавления в уравнение еще не включенных слагаемых незначимо улучшают модель; а попытки удаления уже включенных в модель слагаемых значимо ее ухудшают, поэтому процедура пошагового регрессионного анализа была прекращена. В результате анализа итоговое множественное уравнение регрессии для КПД АД при изменении напряжения и частоты для неизменной нагрузки получило следующий вид: $\eta = 0,2155 + 0,00935 f \pm 7 \cdot 10^{-9} U^3$;

Приведем некоторые из полученных коэффициентов:

R-squared = 81,9 percent – коэффициент детерминации, %;

R-squared (adjusted for d.f.) = 74,7 percent – приведенный к числу степеней свободы коэффициент детерминации, %;

Standard Error of Est. = 0,01337 – стандартная ошибка оценивания;

Mean absolute error = 0,0094 – средняя абсолютная ошибка;

Durbin-Watson statistic = 2,537 (P=0,0735) – коэффициент Дурбина-Ватсона и соответствующий ему максимальный уровень значимости.

Оценить влияние напряжения и частоты для КПД ЧПР с помощью процедуры пошагового регрессионного анализа не удалось ($\eta = 0,64125$; $R^2 = 0$). При этом КПД инвертора в зависимости от полезной мощности на валу имеет нелинейную зависимость, характеризующуюся почти линейной зависимостью до 50% нагрузки инвертора, а затем возрастание имеет более слабо выраженный характер.

II Анализ результатов для изменения напряжения и частоты с помощью синхронного генератора:

– уменьшение напряжения практически линейно ($R^2 > 0,85$) уменьшало частоту вращения ротора, снижение тока статорной обмотки лучше всего описывалось экспоненциальной зависимостью (например, для АД 1,1 кВт: $I = 1,322e^{0,005U}$ с $R^2 = 0,895$);

– изменение частоты значимо влияло на ток статорной обмотки и потребляемую из сети мощность в сторону уменьшения при снижении частоты. Это можно связать с потерями в стали, которые не зависят от его нагрузки АД и пропорциональны частоте в степени, близкой к 1,5 и могут быть определены по формуле

$$\Delta P_m = k_{уд} \left(\frac{B_{m \text{ дейст}}}{B_{m \text{ табл}}} \right)^2 \left(\frac{f_{\text{дейст}}}{f_{\text{табл}}} \right)^{1,5} m \quad (1)$$

где $k_{уд}$ – удельные потери для данной марки стали при заданных табличных значениях индукции и частоты, величина $k_{уд}$ указывается в справочниках; $B_{мтабл}$ – действительное амплитудное значение индукции в трансформаторе; m – масса стали сердечника.

III Анализ результатов для изменения напряжения и частоты с помощью трехфазного инвертора:

- выполненный множественный корреляционный и регрессионный анализ в программном продукте Statistica для зависимости *тока холостого хода* от линейного напряжения и частоты.

Информационная часть окна указывает на следующие параметры анализа:

- коэффициент множественной корреляции $R = 0,99726$;
- коэффициент детерминации, показывающий долю общего разброса (относительно выборочного среднего зависимой переменной), которая объясняется построенной регрессией $R^2 = 0,9945$;
- скорректированный коэффициент детерминации составил $0,9927$;
- наблюдается большое значение F-критерия = 544 и даваемый в окне уровень значимости $p = 0,0000$, показывающие, что построенная регрессия высоко значима.

Регрессионная модель приняла вид $I_0 = 8,74 + 0,0306 \cdot U - 0,2278 f$;

- аналогичным образом получим зависимость мощности холостого хода от линейного напряжения и частоты.

Регрессионная модель описывалась уравнением $P_0 = 505 + 2,5 \cdot U - 16,25 f$.

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9686$; значение F-критерий = 46,27 и уровень значимости $p = 0,0056$;

- зависимость $\cos\phi_0$ от линейного напряжения и частоты имеет вид

$$\cos\phi_0 = 0,2207 + 0,00024 \cdot U - 0,00275 f.$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9686$; значение F-критерий = 61,71 и уровень значимости $p = 0,000985$.

IV При изменении нагрузки двигателя *происходит изменение как тока I_1 и мощности P_1 , так и частоты вращения ротора n_2 , скольжения s , КПД η и $\cos\phi_1$* . Зависимости n_2 , s , M_2 , I_1 , $\cos\phi_1$, η и P_1 от P_2 при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$ называются рабочими характеристиками асинхронного двигателя. Их примерный вид (имелись отличия для различных мощностей) для значимо изменяющихся рабочих

характеристик по сравнению с естественными [2] (сплошные линии) для АД представлен на рисунке 4: а (пунктиром) – тенденция к их изменению при уменьшении напряжения с помощью инвертора; б (точками) – с помощью СГ относительно малой мощности; в – указаны при уменьшении частоты инвертором.

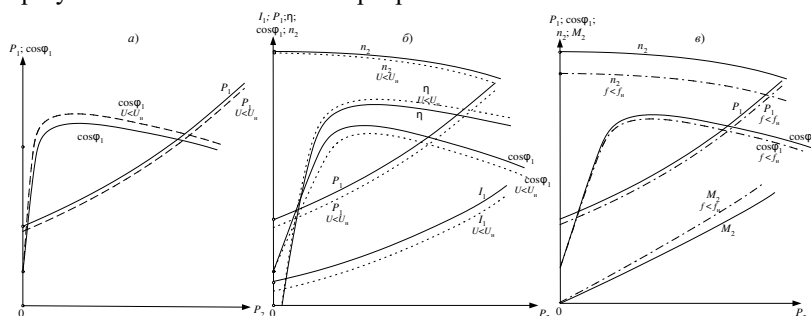


Рисунок 4 – Примерный вид значимо изменяющихся рабочих характеристик АД (а – при изменении напряжения с помощью трехфазного инвертора; б – при изменении напряжения с помощью СГ; в – при изменении частоты с помощью инвертора)

Выводы. Анализ полученных результатов позволяет сформировать следующие выводы:

- асинхронный электродвигатель, питаемый ШИМ напряжением, имеет более низкую эффективность, чем при питании синусоидальным напряжением, в связи с увеличением потерь, вызванных гармониками;

- при работе АД от частотных преобразователей должна оцениваться эффективность системы в целом, а не только электродвигателя;

- каждый случай должен быть должным образом проанализирован с учетом характеристик, как двигателя, так и преобразователя, учитывая следующие параметры: рабочая частота, частота переключения, диапазон скоростей, нагрузка и мощность двигателя, суммарный коэффициент гармонических искажений и т.д.;

- тип измерительных приборов чрезвычайно важен для правильной оценки электрических величин на системах с ШИМ напряжением. Правильные среднеквадратичные значения должны быть использованы для того, чтобы обеспечить верные измерения мощности;

- увеличение частоты коммутации увеличивает КПД двигателя и снижает КПД инвертора (из-за увеличения потерь на переключениях силовых ключей).

В данном исследовании также предложен такой вариант ШИМ управления трехфазного асинхронного двигателя, который отличается минимальностью гармонических составляющих, потерь и разброса момента относительно среднего значения.

Также с помощью полученной адекватной модели можно подбирать: параметры двигателя, характеристики трехфазного инвертора в соответствии с собираемой схемой; также возможно моделирование различных режимов, подбор аппаратов защиты, установка фильтров по различной схеме.

Список использованных источников:

1. Дробов, А.В. Электрические машины: учеб. пособие / А. В. Дробов, В. Н. Галушко. – Минск: РИПО, 2015. – 292 с. : ил.
2. В. Г. Черномашенцев, В. А. Пацкевич, В. Н. Галушко. Электрические машины. Часть I. Трансформаторы и асинхронные двигатели: учебное пособие / под ред. В.Г. Черномашенцева; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2010. – 131с.
3. Галушко, В.Н. Надежность электроустановок и энергетических систем: учеб. Пособие / В.Н. Галушко, с. г. Додолев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 154 с.
4. Коваленко В.М., Свито И.Л. Применение MathCad в электротехнических расчетах. Методическое пособие к выполнению контрольных заданий/Под ред. В.М. Коваленко, И.Л. Свито. – Минск: БГУИР, 2008. – 52 с.
5. Разложение функций в ряд Фурье. [Электронный ресурс] база содержит теоретические сведения по разложению функций в ряд Фурье. Режим доступа: http://www.physics.nad.ru/Physics/Cyrillic/harm_txt.htm. – Загл. с экрана.
6. Практическое руководство по качеству электроэнергии. [Электронный ресурс] база данных содержит информацию о причине возникновения гармоник и результат их воздействия. Режим доступа: http://i.cpecstroyervice.ru/u/e8/7174f6b7f311e29efa465f826c674f/-/3_1_Гармоники_причины_и_последствия.pdf. – Загл. с экрана.
7. Martin Sprutch. DELC-training traction chain, converter theory. Bombardier transportation/M. Sprutch. – Mannheim, Germany, 2011. – 80 с.
8. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink./Под ред. И.В. Черных – СПб.: Питер, 2007. – 288 с.

Алферова Тамара Викторовна, к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение», Республика Беларусь, Гомель, УО «ГГТУ им П.О. Сухого», alferowa.tam@yandex.ru

Алферов Александр Александрович, ассистент кафедры «Электроснабжение», Республика Беларусь, Гомель, УО «ГГТУ им П.О. Сухого», ALF_ALF@tut.by

Бахур Сергей Иванович, аспирант кафедры «Электроснабжение», Республика Беларусь, Гомель, УО «ГГТУ им П.О. Сухого», sergbax@mail.ru

Галушко Виктор Николаевич, к.т.н., доцент кафедры «Электротехника» Республика Беларусь, Гомель, УО «Белорусский государственный университет транспорта», 5355628@mail.ru

MODELING OF THE THREE-PHASE INVERTER OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR AND ANALYSIS OF WORKING CHARACTERISTICS

T. V. Alferova¹, A.A. Alferov¹, S.I. Bakhur¹, V.N. Galushko²

Abstract. In the article methods of frequency and voltage regulation are considered on the example of a three-phase autonomous voltage inverter (SIN) with sinusoidal pulse width modulation (PWM) at a carrier frequency. Based on the obtained results, the difference in the values of the moment and voltage, obtained by calculation and modeling, was calculated. A variant of the PWM control of a three-phase asynchronous motor is considered, characterized by the minimum harmonic components, electric and magnetic losses, the torque spread with respect to the mean value. An adequate model of a three-phase inverter of an induction motor is proposed.

Keywords: three-phase voltage inverter, pulse width modulation, a mathematical model, working characteristics of the motor.

T.V. Alferova, ph.d., assistant professor of "Electric Engineering", the Republic of Belarus, Gomel, UO "GSTU named after P.O. Suhoi", alferowa.tam@yandex.ru

A.A. Alferov, assistant of " Electric Engineering", the Republic of Belarus, Gomel, UO "GSTU named after P.O. Suhoi", ALF_ALF@tut.by

S.I. Bakhur, graduate student of " Electric Engineering ", the Republic of Belarus, Gomel, UO "GSTU named after P.O. Suhoi", sergbax@mail.ru

V. N. Galushko, ph.d., assistant professor of " Electrical engineering", Republic of Belarus, Gomel, UO «Belarusian State Transport University», 5355628@mail.ru